WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

О макаронном компьютере и других аналоговых устройствах

А. К. ДЬЮДНИ

В НАШИ дни, когда мы говорим о компьютерах, то неизменно подразумеваем цифровые ЭВМ. Их аналоговые собратья, электромеханические устройства, когда-то доминировавшие в мире вычислительной техники, теперь оказались преданными забвению. Перед второй мировой войной в ведущих исследовательских центрах работали замысловатые аналоговые компьютеры с витиеватыми названиями, такими, например, как «непрерывный интерграф» или «дифференциальный анализатор». В подобных машинах для представления математических уравнений использовались электрические или механические аналоги. Переменная в математическом уравнении обычно представлялась какой-нибудь физической величиной, например электрическим напряжением или углом поворота механического валика. Аналоговые компьютеры можно было применять для решения уравнений из различных областей научных исследований: баллистики, аэродинамики, анализа электрических цепей и т.д.

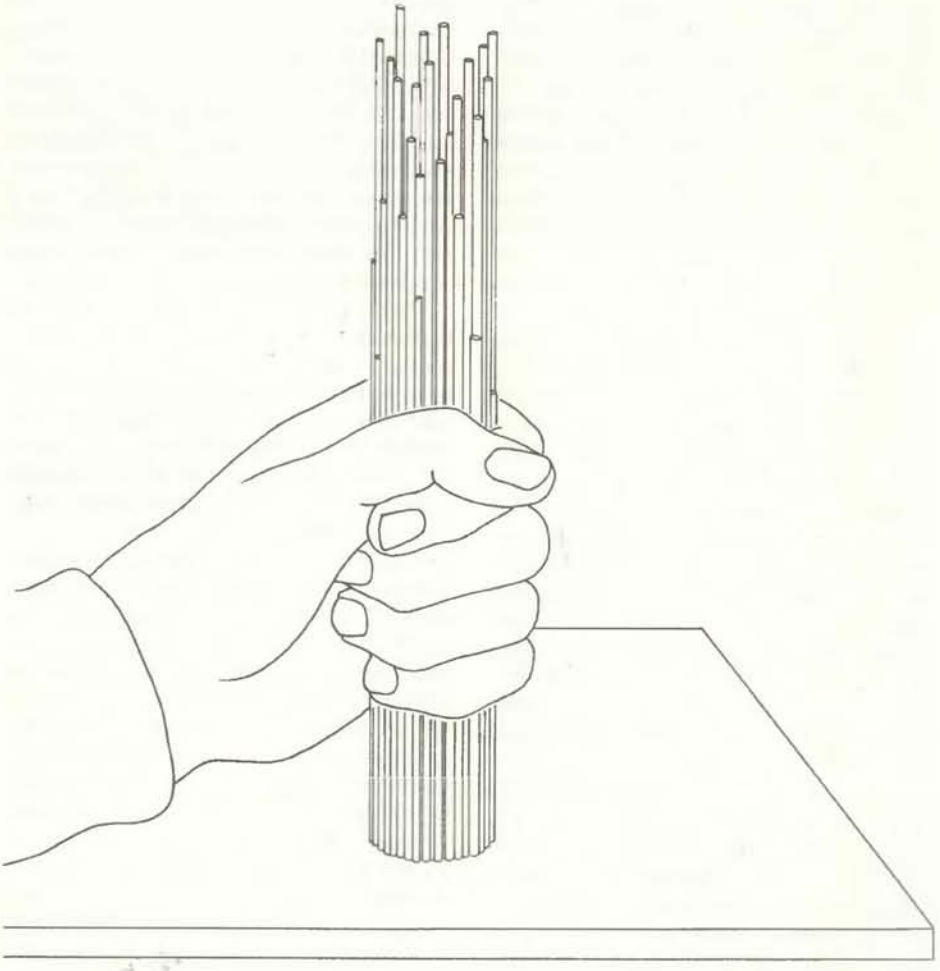
Однако аналоговые машины не смогли выдержать конкуренции с цифровыми ЭВМ, появившимися в конце второй мировой войны и начавшими быстро распространяться сразу после ее окончания. Аналоговые компьютеры, казалось, были способны решать лишь ограниченные классы задач, главным образом дифференциальные уравнения, да и то с относительно невысокой точностью. И напротив, что касается цифровых вычислительных машин, то вскоре стало ясно, что их можно запрограммировать для решения бесконечного многообразия задач самой различной природы, и притом с очень высокой точностью. Постепенно аналоговые машины отходили на второй план, и уже к середине 60-х годов о них лишь мельком упоминалось в книгах по вычислительной технике.

Хотя потомки грандиозных аналоговых машин 20-х и 30-х годов все еще используются в ряде исследовательских центров (новые устройства этого типа продолжают разрабатывать и сейчас), никто всерьез не ожидает, что аналоговые компьютеры смогут снова выйти на передний план. Революцию цифровых ЭВМ нельзя повернуть вспять. Однако верно также и то, что подобные революционные скачки в развитии техники иногда приводят к забвению привлекательных сторон, присущих устройствам старых типов.

ОСНОВНОЕ привлекательное свойство аналоговых компьютеров заключается в том, что при их использовании мы получаем результат как будто без всяких затрат. Решение задачи, которое потребовало бы многочасового вычисления на бумаге (или даже при помощи цифрового компьютера), получается просто при наблюдении физической системы, по мере того как она быстро достигает определенного конечного состояния. В некоторых наиболее ярко выраженных случаях этот процесс кажется почти мгновенным — устройство вычисляет как бы по мановению волшебной палочки.

Рассмотрим компьютер системы МАУ, или Макаронное аналоговое устройство. Этот "прибор" в опробованной мною конфигурации способен отсортировать до 700 чисел в порядке убывания их величины. Сортировка представляет собой распространенный класс задач, решаемых при помощи цифровых компьютеров. Были разработаны довольно изощренные и эффективные алгоритмы сортировки. Проблема, однако, заключается в том, что время, требующееся для сортировки набора чисел, возрастает существенно быстрее, чем количество сортируемых чисел. Пользуясь компьютером МАУ, мы должны затратить некоторое время на подготовку машины к конкретному набору чисел, а также на «чтение» полученных результатов, но сам процесс сортировки не требует почти никаких временных затрат.

Посмотрим, как работает компьютер МАУ. Для каждого числа из сортируемого набора возьмем макаронную палочку (невареную) и укоротим ее таким образом, чтобы ее длина соответствовала величине данного числа. Разумеется, следует выбрать подходящий масштаб. Затем возьмем все обработанные макаронные палочки в руки и, держа пучок вертикально и не очень плотно сжимая, резко опустим его на поверхность стола; каждая макаронная палочка коснется поверхности стола. Теперь, чтобы получить отсортиро-



Макаронный компьютер сортирует совокупность чисел в порядке убывания

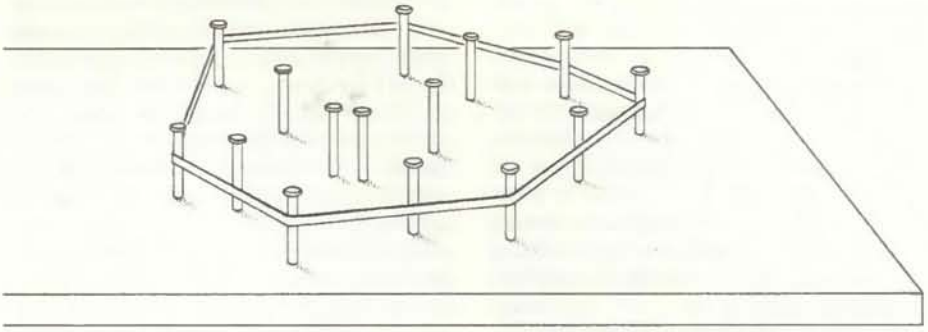
WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

ванную последовательность чисел, нужно лишь доставать по порядку палочки из пучка: сначала самую длинную, затем — самую длинную из оставшихся и т.д., до тех пор пока не останется ни одной. Выбранные таким образом палочки измеряются, и соответствующие величины записываются.

В операции сортировки необходимо различать три фазы. Я называю их фазой предварительной обработки, аналоговой фазой и фазой завершающей обработки. В фазе предварительной обработки мы отмеряем длину макаронных палочек и укорачиваем их до нужного размера. В аналоговой фазе действует простой механизм, сортирующий палочки по длине. В фазе завершающей обработки мы выбираем их одну за другой и получаем отсортированную последовательность. Все устройства, о которых здесь идет речь, требуют как фазы предварительной, так и фазы завершающей обработки. Точно так же дело обстояло и с первыми аналоговыми компьютерами. На самом деле было затрачено много усилий и средств на то, чтобы ускорить процессы, протекающие в этих фазах.

Кое-кто, возможно, заметит: «Ну хорошо, при помощи МАУ можно отсортировать 700 чисел, а что делать, если их будет 7000 или, скажем, 7 000 000?». Чтобы ответить на этот каверзный вопрос, упомянем лишь о машине СУПЕР-МАУ, модифицированном автопогрузчике с вилочным захватом, который может поднять семь миллионов тщательно измеренных макаронных палочек (сверхдлинных) и прихлопнуть их торцами о кирпичную стену.

ВОЗМОЖНО, найдутся и такие читатели, которые скажут: «Я могу отсортировать 700 чисел быстрее, чем МАУ. Пользуясь лишь карандашом и бумагой, я закончу процедуру даже раньше, чем макаронные палочки будут укорочены до нужных размеров!» К сожалению, я должен сознаться, что это, по-видимому, верно. Предположим, что потребуется примерно минута, чтобы прочесть очередное число из списка, отмерить соответствующую длину на макаронной палочке, обрезать ее и вставить в пучок. Предположим далее, что потребуется около 10 секунд на то, чтобы выбрать одну палочку из пучка и измерить ее после операции «прихлопывания» (занимающей всего лишь секунду). Тогда в общей сложности нужно будет затратить более 13 часов, чтобы при помощи МАУ отсортировать 700 чисел, причем все это время, за исключением одной секунды, будет потрачено на фазы предварительной и завершающей обработки. С другой стороны, соревнующийся с МАУ человек должен будет многократно просматривать список неотсо-

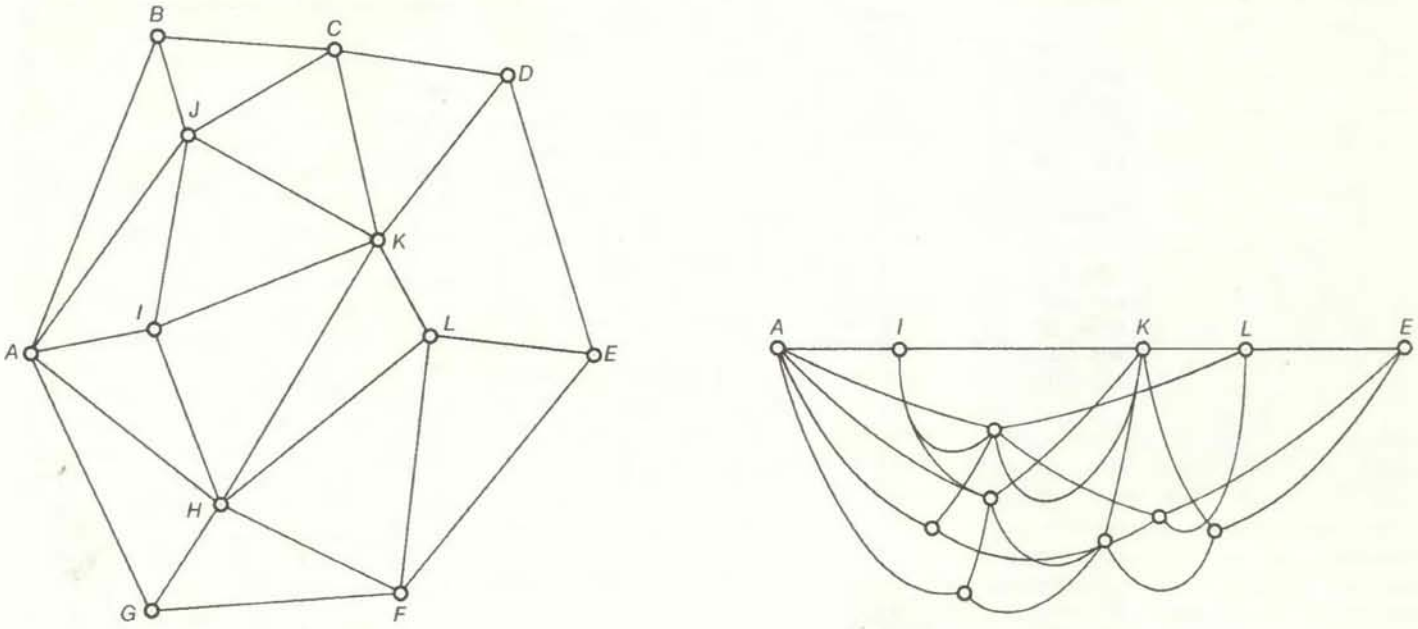


Нахождение выпуклой оболочки множества точек на плоскости

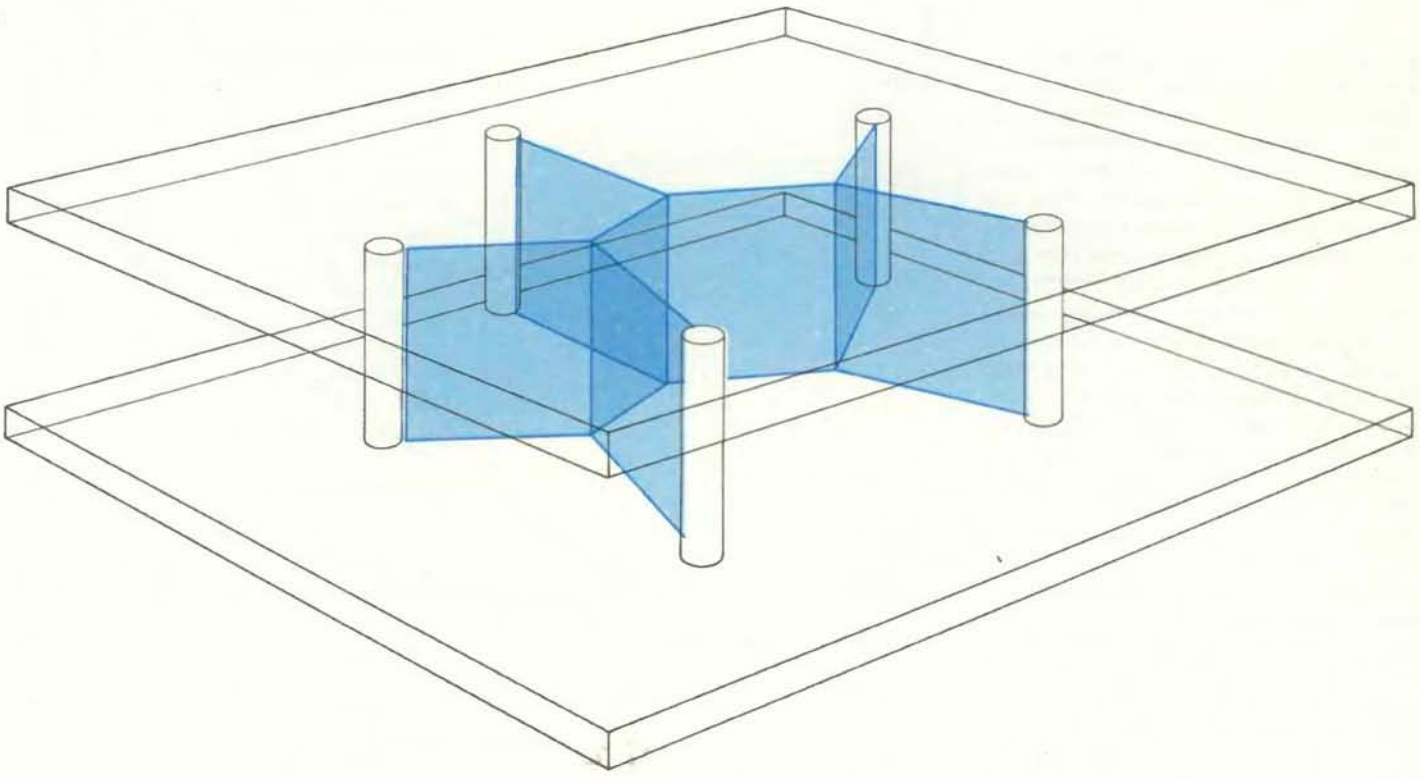
Несколько возможных функций, связывающих время вычислений с размером задачи

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

ртированных чисел в поисках максимального, записывать найденное число в список чисел по порядку и вычеркивать его из исходного. Потребуется около одной десятой доли секунды, чтобы посмотреть на каждое число в списке, и, таким образом, всего нужно будет затратить (700 + 699 + . . . + 2 + 1)/10 секунд, чтобы отсортировать заданный массив чисел. Суммарное время равно 175 минутам и 15 секундам, что дает неоспоримую победу над МАУ. Не следует ли сделать такой вывод, что привлекательность мгновенной аналоговой фазы целиком и полностью сводится на нет слишком длительными фазами предварительной и завершающей обработки? Не будем торопиться с выводами. Допустим, что вдохновленный победитель захочет посоревноваться с машиной СУПЕР-МАУ в сортировке нескольких миллионов чисел. В то время как машине потребуется около 15 лет, чтобы справиться с этой задачей, человек не сможет закончить работу раньше чем через 74 000 лет! Чтобы понять, в чем состоит преимущество СУПЕР-МАУ, нужно исследовать вопрос о том, как зависит время вычислений от размеров задачи. Как мы уже говорили, операция прихлопывания пучка макаронных палочек σ стену занимает всегда одно и то же время независимо от количества палочек в пучке. Будем говорить, что это операция с постоянным временем. Фазы предварительной и завершающей обработки представляют собой операции с линейным временем: их продолжительность возрастает прямо пропорционально с увеличением размера списка сортируемых чисел. Длительность же операций, выпо-



Аналоговое устройство для отыскания кратчайшего пути между двумя вершинами на графе



„Мыльное" решение задачи о минимальном дереве Штайнера для пяти точек на плоскости

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NARODRU

лняемых человеком вручную, возрастает в этом случае значительно быстрее. Хотя список неотсортированных чисел постепенно уменьшается, количество операций, связанных с просмотром чисел, возрастает как квадратичная функция от размеров списка. В таких случаях мы говорим, что сортировка происходит с квадратичным временем. Рано или поздно процедура с линейным временем должна одержать верх над процедурой с квадратичным временем.

Даже несмотря на длительные фазы предварительной и завершающей обработки, достаточно мощная машина типа МАУ может выиграть соревнование по сортировке у современной цифровой ЭВМ, проводящей вычисления по самым эффективным алгоритмам сортировки. Последние требуют порядка $n \log n$ шагов, где n — количество сортируемых чисел в последовательности, а log — обозначение логарифмической функции. Процедура с линейным временем, конечно, в принципе лучше, однако страшно себе представить, каких размеров должно быть макаронное устройство, чтобы выиграть это соревнование. Такое устройство, назовем его СУПЕР-ДУПЕЛЬ-МАУ, наверное, можно построить только в космосе, а прихлопывать пучок пришлось бы о поверхность Луны.

Следующее устройство из моей коллекции определяет границу выпуклой оболочки n точек на плоскости. Выпуклая оболочка — это наименьшая выпуклая область, содержащая все n точек. Она полностью определяется своей границей — многоугольником, вершины углов которого находятся в ограничивающих, или «внешних», точках, принадлежащих совокупности n. Устройство, вычисляющее границу выпуклой оболочки, сделано из большой широкой доски, нескольких гвоздей и круглой резинки. Я называю его ДАУ, а полное название Досочно-гвоздевое аналоговое устройство с круглой резинкой. Было бы заманчиво включить в сокращенное название буквы от слов «гвозди» и «круглая резинка», но тогда оно получилось бы слишком громоздким, что-нибудь наподобие ДОГВАУКР.

Чтобы собрать устройство, достаточно вбить n гвоздей в доску в места заданного расположения точек. Затем нужно взять круглую резинку, растянуть ее так, чтобы окружить все гвозди, вбитые в доску, и отпустить. Резинка прочно сядет на место, и ее контур точно определит многоугольник, представляющий собой границу выпуклой оболочки.

ЗДЕСЬ мы опять приходим к линейной по времени процедуре, которая предшествует аналоговой операции, заключающейся в данном случае в освобождении резинки. Потребуется несколько секунд, чтобы определить нужную точку для каждого гвоздя и вбить его в доску. После того как резинка отпущена, процедура определения границы полученной таким образом выпуклой оболочки займет несколько меньше времени, чем заняла бы процедура с линейным по n временем, потому что соответствующие замеры будут проделаны лишь для тех гвоздей, которых касается резиновый обруч.

Наиболее быстрый из известных алгоритмов отыскания границы выпуклой оболочки требует $n \log (\log n)$ шагов вычисления. Данная функция от n настолько близка к линейной, что соревноваться с цифровым компьютером, работающим по такому алгоритму, сможет, наверное, лишь колоссальная машина ДАУ, размеры которой были бы сравнимы с размерами Солнечной системы.

Задачей третьего устройства является отыскание кратчайшего пути, соединяющего две вершины на графе. В данном случае под графом мы понимаем набор отрезков, или ребер, соединяющих точки, называемые вершинами. В некоторых графах ребра могут быть различной длины, и именно с таким графом должно будет работать аналоговое устройство ШНАУ, основным элементом которого служит шнурок, соединяющий вершины графа и представляющий собой его ребра. Каждая же вершина графа представляется маленьким медным колечком. Если какие-то две вершины соединены ребром, то в аналоговой модели этого графа соответствующие колечки соединяются кусочком шнурка нужной длины, к обоим концам которого пришиты крючки.

Чтобы найти кратчайший путь между вершинами u и v на графе, возьмем в одну руку колечко, представляющее вершину u, а в другую — колечко, представляющее v, и поднимем всю систему колечек, соединенных между собой шнурками. Затем разведем руки, натягивая шнурки до предела. В результате искомый кратчайший путь будет представлен несколькими натянутыми шнурками, оказавшимися в верхней части поднятой системы. Шнурки же, представляющие ребра, которые не вошли в этот кратчайший путь, остаются менее натянутыми (см. верхний рисунок на с. 94). Если колечки были помечены буквами, соответствующими обозначению вершин, то последовательность вершин, через которые проходит кратчайший путь, легко установить, прочтя метки на колечках, соединенных натянутыми шнурками.

Если за размер графа принять количество его вершин n, то наибольшее количество шагов, которое потребуется как для фазы предварительной, так и для фазы завершающей обработки, будет определяться линейной зависимостью от n. Аналоговая фаза вычисления, как и обычно, выполняется в данном случае почти мгновенно. Наиболее быстрый известный алгоритм для решения этой задачи на цифровом компьютере требует порядка n^2 шагов.

ОБИДНО, конечно, что приходится учитывать фазы предварительной и завершающей обработки при подсчете сравнительного быстродействия описанных выше устройств, но, честно го-

Лазерное аналоговое устройство показывает, что число 15 является не простым, а составным

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

воря, это неизбежно, так как они представляют собой неотъемлемую часть общей процедуры решения задачи. Без них мы не смогли бы ни поставить задачу, ни «прочесть» полученный результат.

Некоторые аналоговые устройства совершенно не требуют подобной обработки, потому что они непосредственно встроены в систему, которая сразу же использует полученный результат. Приведем два примера. Первый — это система сортировки на спицах, когда-то широко применявшаяся в библиотечных каталогах. Второй пример — трюк с балансированием тарелки на одном пальце. В системе сортировки на спицах используются карточки с прорезями и маленькими отверстиями по краям, при помощи которых можно быстро определить, какие книги должны быть сданы к тому или иному сроку. Карточки укладываются в стопку и через отверстия, соответствующие данному дню, пропускается длинная спица. Если теперь поднять спицу, то на ней останутся только те карточки, у которых в том месте, куда вставлена спица, находится отверстие. Карточки, имеющие в этом месте прорези, остаются в стопке.

Трюк с балансированием показал мне «матемаг» Роналд Л. Грейам, работающий в фирме AT&T Bell Laboratories. Сначала Грейам удерживает тарелку на трех широко расставленных пальцах. По мере того как он сближает пальцы, центр тяжести тарелки остается между ними, поскольку палец, на который приходится меньший вес, легче скользит по дну тарелки. Если сблизить пальцы настолько, чтобы между ними можно было вставить четвертый палец, то положение этого четвертого пальца окажется достаточно близким к центру тяжести, и тарелка будет балансировать на этом пальце, после чего можно убрать остальные. Грейам предупреждает, что начинающим следует основательно попрактиковаться, прежде чем демонстрировать трюк за праздничным столом.

До сих пор я применял аналоговые устройства лишь к тем задачам, для решения которых уже были найдены довольно быстрые алгоритмы. О таких задачах говорят, что они имеют полиномиальную сложность, потому что количество шагов вычисления, требующееся для их решения, можно выразить (или по крайней мере ограничить сверху) через полиномиальную функцию от n, числа, характеризующего размер задачи. Например, время решения может оказаться пропорциональным самому числу n, или n^2, или $n \log n$, или n^{27}. Существуют и такие задачи, в том числе имеющие практическое значение, для которых не найдено полиномиального алгоритма. Лучшие из известных алгоритмов их решения требуют времени, экспоненциально возрастающего с ростом размера задачи. Обычно время решения оказывается пропорциональным 2^n — функции, растущей быстрее любого полинома. При большом, а иногда даже умеренном размере задачи время, необходимое для ее решения, равно просто чудовищной величине. Почему бы не попробовать наши устройства на некоторых из этих труднорешаемых задачах?

Например, это могла бы быть задача отыскания самого длинного из всевозможных путей, соединяющих две вершины на графе. Она оказалась значительно труднее, чем задача отыскания кратчайшего пути. На самом деле об этой задаче говорят как об *NP*-полной. Этот термин применяют к труднорешаемым задачам, для которых не удается найти полиномиального алгоритма. Читатели, желающие подробнее ознакомиться со свойством *NP*-полноты и не боящиеся иногда встречающихся в тексте математических обозначений, могут прочесть отличную книгу М. Гэрри и Д. Джонсона «Вычислительные машины и труднорешаемые задачи» (издательство «Мир»,1982 г.— *Прим. перев.*)

Иногда, чтобы решить задачу, нужно приложить физическую силу. Взять, к примеру, задачу о кратчайшем пути между двумя вершинами на графе, решенную натяжением шнурков. Если потянуть за колечки сильнее, то шнурки начнут рваться один за другим. Наконец, перед тем, как порвется вся система, все оставшиеся целыми шнурки будут туго натянутыми. В этот момент мы получаем решение задачи о самом длинном пути.

Всегда ли? На некоторых графах этот метод оказывается эффективным, на других он не работает. Возможно, читатели получат удовольствие, построив примеры графов как первого, так и второго типов. Когда вы натягиваете систему из нескольких шнурков, первый порвавшийся шнурок считайте «наихудшим случаем».

Возможно, не следует пытаться «с лету» решать *NP*-полную задачу аналоговыми средствами. Однако теория о вычислимости утверждает лишь то, что *NP*-полные задачи являются труднорешаемыми только для цифровых компьютеров, и не содержит никаких фактов, отрицающих возможность решения таких задач аналоговыми методами. Поэтому сделаем еще одну попытку.

В задаче о минимальном дереве Штайнера требуется соединить n точек на плоскости графом минимальной общей длины. Эта задача по существу эквивалентна задаче соединения n городов системой дорог, общая длина которых была бы минимальной. В число вершин графа помимо исходных точек можно включить еще и дополнительные, так сказать для построения проселочных дорог. Нетрудно убедиться, что искомый минимальный граф представляет собой дерево, т.е. граф, в котором отсутствуют замкнутые пути. Более того, оказывается, что любая дополнительная вершина в минимальном дереве соединяется с тремя другими вершинами ребрами, образующими углы 120° относительно друг друга (см. нижний рисунок на с. 94).

Задача о минимальном дереве Штайнера является *NP*-полной, и для нее не известно алгоритма, требующего менее 2^n шагов вычисления (где n — количество вершин). Тем не менее существует прибор, называемый мною Пузырьковым аналоговым устройством, который, по-видимому, дает «мыльное» решение описанной задачи. Приделайте ручку к двум параллельно расположенным прозрачным пластмассовым пластинкам и вставьте между пластинками тоненькие штырьки, представляющие исходные точки, которые нужно соединить. Затем погрузите устройство в мыльную воду. Вынув его из воды, вы увидите, как мыльная пленка соединит n штырьков, образуя изящное дерево Штайнера.

Однако ваша радость при виде этого решения будет преждевременной. Можно ли быть полностью уверенным, что полученное таким образом дерево является деревом минимальной длины? На самом деле мыльная пленка образует, как правило, всегда наименьшую возможную сеть для данной топологии, однако может существовать и другая топология, для которой может быть построено еще более короткое дерево. В зависимости от схемы расположения штырьков и угла, под которым устройство вынимается из мыльной воды, полная длина участков мыльной пленки может оказаться, а может и не оказаться абсолютно минимальной. Таким образом, и эта попытка решить *NP*-полную задачу аналоговыми методами не принесла успеха.

Одна из наиболее известных вычислительных задач заключается в том, чтобы определить, является ли заданное целое число N простым или составным. (Если оно делится без остатка на какое-нибудь число, отличное от N или 1, то оно составное; в противном случае — простое.) Эта задача имеет очень быстрое аналоговое решение, если воспользоваться Лазерным аналоговым устройством, или сокращенно ЛАУ. Нужно установить два параллельных зеркала *M1* и *M2* и два лазера, так чтобы лучи, испускаемые лазерами, многократно отражались от зеркал *M1* и *M2*, как показано на рисунке на с. 95. Угол, под которым направлен один лазер, подобран таким образом, чтобы его луч отражался по N раз от каждого зеркала, а затем попадал в

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

детектор, находящийся на конце зеркала *M1*. Второй лазер располагается так, что вначале его луч совпадает с лучом первого лазера, а затем второй лазер быстро меняет направление и его луч проходит через определенный диапазон углов.

По мере того как меняется направление второго луча, он периодически попадает в детектор на конце зеркала *M1*. По всей длине этого зеркала проходит также специальная детектирующая полоса. Она срабатывает всякий раз, когда два луча попадают в одну и ту же точку. За состоянием детектора на конце зеркала *M1* и за детектирующей полосой следит простая электронная схема. Если оба детектора срабатывают одновременно, схема регистрирует это совпадение, и зажигается лампочка. Этот световой сигнал говорит о том, что число N является не простым, а составным. Для того чтобы имело место подобное двойное совпадение, необходимо, чтобы луч второго лазера отразился n раз от зеркала *M1* и число N должно делиться на n без остатка.

Говоря об этой задаче, следует быть очень осторожным при выборе параметра, характеризующего ее размер. Если этот размер определить просто как N, то существуют цифровые алгоритмы, способные решить эту задачу за полиномиальное время. Однако правильнее было бы считать, что размер задачи гораздо лучше характеризует величина $\log N$, так как она представляет собой длину цепочки цифр, образующих число N. При таком определении размера задачи никто не может сказать, является она *NP*-полной или нет. Принимая во внимание, что компьютер ЛАУ успешно справился с этой задачей, а остальные аналоговые устройства при попытках решения так называемых трудноразрешаемых задач не справились с ними, не следует ли предположить, что последняя из рассмотренных задач не является *NP*-полной?

До сих пор я избегал очень важного вопроса, касающегося технической реализации таких аналоговых устройств, как МАУ, ДАУ, ШНАУ и ЛАУ. Хотя каждое из этих устройств можно действительно построить и даже воспользоваться им, демонстрируя решение небольших задач, было бы, конечно, неразумно создавать подобные устройства в расчете на серьезное применение. Однако на эту проблему можно взглянуть и с точки зрения «идеальных» технических возможностей, когда конструктор располагает какими угодно идеальными материалами и когда каждое устройство работает точно так, как было задумано. Было бы очень интересно пофантазировать о том, на что способны аналоговые вычислительные устройства в таких идеальных условиях.

Возможно, читатели в своих письмах опишут какие-нибудь другие аналоговые устройства, я бы ознакомился с их изобретениями с большим интересом. Честно говоря, мне не известно, кто изобрел первые два устройства, описанные в этой статье. Наверное, они уже стали частью своеобразного фольклора, бытующего в кругах, связанных с вычислительной наукой и техникой. Шнурковое устройство, кажется, изобрели М. Минский и С. Пэйперт из Массачусетского технологического института. Описание пузырькового устройства я нашел в удивительной книжке С. Айзенберга «Теория мыльной пленки и мыльных пузырей». Лазерное аналоговое устройство является моим собственным изобретением.

Кстати, это лазерное устройство напомнило мне об одной забавной задаче, над которой некоторым читателям будет, наверное, интересно поразмыслить. Представим себе зеркальный ящик в виде плоского прямоугольника. Предположим, что зеркальные стороны этого прямоугольника обладают идеальной отражательной способностью. В идеальных условиях можно было бы удалить одну-единственную точку в вершине одного из углов ящика и пропустить одномерный лазерный луч внутрь через это бесконечно малое отверстие. Полученное таким образом устройство вычисляет нечто касающееся угла, под которым направлен луч. Ответ зависит от того, выйдет ли когда-нибудь луч обратно из ящика, а вот как поставить задачу — неизвестно.

Издательство **МИР** *предлагает:*

РУКОВОДСТВО ПО НЕОРГАНИЧЕСКОМУ СИНТЕЗУ

В шести томах
Под редакцией Г. Брауэра
Перевод с немецкого

Книга переводится с третьего, составленного Г. Брауэром, издания «Руководства», широко известного во всем мире и ставшего по существу энциклопедией неорганического синтеза.

Перевод на русский язык первого издания был осуществлен в 1956 г. Издательством иностранной литературы. «Руководство» широко вошло в повседневную практику высших и средних специальных учебных заведений, институтов, заводских лабораторий, научных учреждений. Им пользуются не только химики-неорганики, но и представители многих других профессий — технологи, биологи, геологи и др.

Однако это издание давно стало библиографической редкостью. В новом издании осуществлен гораздо более широкий охват материала с учетом последних достижений в различных областях синтетической неорганической химии. Ценность книги не только в собрании огромного числа методик синтеза (описан синтез более 3000 препаратов), но очень важен также сделанный авторами отбор наиболее воспроизводимых и простых процессов, позволяющих синтезировать чистые вещества.

Трудно переоценить также значение этого пособия в практике обучения химиков современным методам препаративной химии. Обширность содержащегося в книге материала дает преподавателю возможность выбрать синтез, соответствующий поставленной задаче — отработки определенного метода работы, изучения химии элементов и т.д. Большую пользу может принести настоящий справочник и при выборе задания для курсовых работ учащихся, изучающих химию.

1985. Цена 13р.70к. за комплект.

Подписка принимается
магазинами и отделами
подписных изданий

ИЗДАТЕЛЬСТВО МИР